НОВЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ИНСПЕКЦИИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ И ПОДЛОЖЕК

И.И. Бойков, Д.А. Дормидошина, Ю.А. Евстифеев, Ю.В. Рубцов (АО «ЦКБ «Дейтон»)

В отечественном производстве изделий электронной техники (ИЭТ) с автоматизированным программно-аппаратным комплексом (АПАК) визуального поиска дефектов применяют систему компьютерного зрения с технологией искусственного интеллекта для разных изделий ИЭТ: корпусов микросхем, пластин для производства микросхем, печатных плат и др. При этом растет производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия. В статье показаны результаты применения нового эффективного алгоритма адаптивной инспекции для широкой номенклатуры металлокерамических корпусов и подложек.

Ключевые слова: изделий электронной техники, программно-аппаратный комплекс, дефекты, компьютерное зрение, адаптивная инспекция.

ВВЕДЕНИЕ

Кратное увеличение объемов производства и числа наименований изделий электронной техники (ИЭТ) в России в 2022–2026 гг. в условиях санкций и запрета легального доступа к лучшим зарубежным системам поиска дефектов в ИЭТ предъявляет жёсткие требования к контролю дефектов и надежности электронной компонентной базы (ЭКБ) [1,2]. Однако с 2022 г., когда начались массовые поставки комплектующих из дружественных стран, в отдельных категориях продукции процент дефектов возрос до 40%. По данным АО «Микрон», процент брака на производственных линиях не должен превышать 15%. Для решения проблемы в России разработан и введён в эксплуатацию автоматизированный программно-аппаратный комплекс (АПАК) визуального поиска дефектов с технологией искусственного интеллекта для разных изделий (корпусов микросхем, пластин для производства микросхем, печатных плат и др.), повышающий производительность труда, выход годных и репутацию предприятия. Уникальность разработки в том, что это готовый аппаратно-программный комплекс, который возможно внедрить на предприятие в короткие сроки. По отзывам специалистов, российский комплекс по своей функциональности превосходит аналоги от мировых лидеров —MEK Marantz Electronics (Япония), Koh Young Technology (Южная Корея), Jutze Intelligence Technology Co (Китай) [1].

Важный элемент ИЭТ - металлокерамические подложки (МКП) [3], обеспечивающие механическую целостность конструкции, электрическую изоляцию и эффективный теплоотвод от полупроводниковых кристаллов. Выход МКП из строя из-за скрытого дефекта означает не только отказ дорогостоящего ИЭТ, но и потенциальную аварию всего устройства, где применяется ИЭТ.

Металлокерамическая подложка — основа силовых электронных модулей, представляющая собой пластину из высокотемпературной керамики [4] на основе оксида алюминия Al_2O_3, на поверхность которой методом спекания нанесён слой металлизации, формирующий токоведущие дорожки. В условиях крупносерийного производства критически важен сплошной автоматизированный контроль геометрии токоведущих элементов МКП [1], так как ручной оптический контроль не удовлетворяет требованиям к производительности и воспроизводимости результатов [5]. Однако автоматизация данной операции сопряжена с принципиальной трудностью: цветовые характеристики керамики и металлизации на ней нестабильны от партии к партии. Это делает традиционные подходы к техническому зрению, применяемые в программном обеспечении (ПО) АПАК и опирающиеся на цветовую сегментацию [5] и алгоритм Кэнни [6], малоэффективными и требующими постоянной донастройки под конкретную партию.

В этой работе предложено решение проблемы, описаны разработанные дополнительные возможности АПАК при поиске дефектов для широкой номенклатуры металлокерамических корпусов и подложек.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

МКП изготавливаются по единому технологическому процессу, но применение различных печей для обжига приводит к значительному разбросу цветовых характеристик [4]. Керамика имеет характерный розовый оттенок, варьирующийся по насыщенности и яркости в зависимости от конкретной печи и зоны обжига. Металлизация меняет тон в широком диапазоне: от светлого до тёмного, в зависимости от температурного профиля и химии травления. Дополнительную проблему создаёт лазерная резка: внешний контур керамики имеет неровный край, который пороговые алгоритмы либо ложно принимают за дефект, либо игнорируют, теряя часть информативной геометрии изделия.

Адаптивная бинаризация даёт разрывы контура при малейшем снижении локального контраста цвета на переходе «металлизация – керамика». Переход к цветовому пространству HSV с кластеризацией методом k-средних [7] (где $k = 2$) повышает устойчивость к снижению контраста, однако не решает проблему полностью: при смене партии и оттенка керамики границы кластеров смещаются, требуя повторной калибровки. Предобработка изображения с применением цветовых фильтров, а также фильтров контрастности и яркости, предусмотренных в ПО АПАК [8], значимых результатов не дает — проблема

не в отношении сигнал/шум, а в нестабильности цветового порога, разделяющего два материала.

В рамках инспекции данного типа изделий выполняется контроль соответствия размеров МКП. Контролируются три группы расстояний:

- габаритные (внешние) размеры подложки;
- расстояния между границами элементов металлизации;
- расстояния между границей элемента и внешней границей керамики.

Любое отклонение измеренного размера за пределы заданного допуска классифицируется как дефект. Таким образом, задача контроля качества МКП сводится к построению контуров изделия и элементов металлизации на нём и измерению расстояний между ними.

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Для решения данной задачи специалистами АО «ЦКБ «Дейтон» разработаны и экспериментально сравнены три подхода к выделению контуров структурных элементов в нестабильном цветовом пространстве.

Первый вариант решения задачи ранее хорошо зарекомендовал себя при контроле металлокерамических корпусов интегральных микросхем и основан на поиске контуров с применением оператора Кэнни [6] с применением морфологического замыкания разрывов. Из-за отличий параметров печей и процессов травления от партии к партии, а также изменений в фотошаблонах точность обнаружения контуров при данном подходе составляет приблизительно 30%. Во многом это связано с высокой зависимостью контуров от уровня локального контраста [9] на границе между металлизацией и керамикой. Поэтому метод был изменен, кроме того, цветовое пространство изменено из RGB на HSV [7].

Для компенсации цветового разброса применён алгоритм *k*-средних с $k = 2$, разделяющий изображение на два кластера – «металлизация» и «керамика». Точность обнаружения возросла до 60%, но блики на поверхности изделия и шероховатость керамики, а также тени от металлизации всё также создают помехи при обнаружении элементов. При смене печи обжига и цветовой температуры керамики или процесса травления потребовалась повторная калибровка центроидов кластеров (на рис. 1 подсвечены области нестабильного локального контраста, создающие необходимость повторной калибровки центроидов), что приводило к значительным потерям во времени и простою линии с АПАК на предприятии.

Для повышения адаптивности контроля принято решение о применении нейросетевой сегментации изображений с векторной постобработкой. Для решения задач данного класса хорошо зарекомендовала себя свёрточная нейронная сеть с архитектурой YOLO-12 [10]. Она обладает следующими преимуществами:

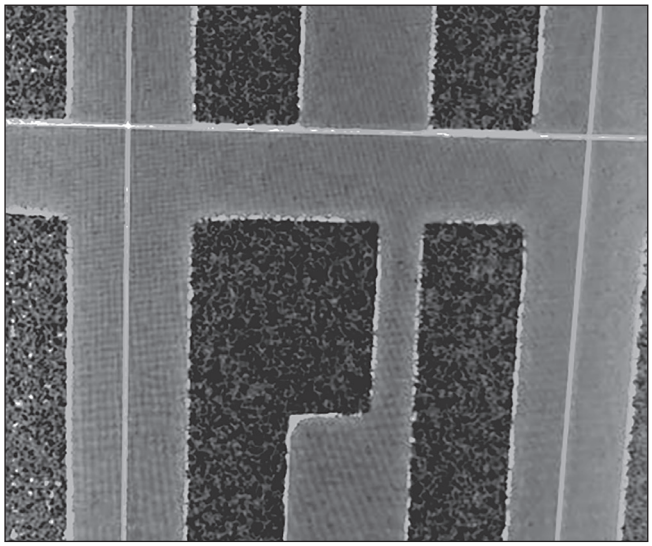


Рис. 1. Области локального контраста, определенные алгоритмом k средних

- встроенная сегментация экземпляров объектов, позволяющая получать точные полигональные маски непосредственно в процессе инференса модели;
- инвариантность свёрточных карт признаков глубоких слоёв к абсолютным значениям цвета и яркости;
- возможность дообучения на относительно малых выборках при корректно подобранном методе аугментации;
- скорость инференса, достаточная для обработки на уровне выше 30 кадров в секунду.

Постобработка масок, полученных с применением нейронной сети YOLO-12, выполняется с применением алгоритма Сузуки-Абэ [11]. Пусть полученное изображение F представимо в виде трех бинарных матриц P, где в каждой матрице пиксель $P_{ij} = 0$, если он не принадлежит ни одному из искомых классов (то есть контуров элементов МКП), и $P_{ij} = 1$, если принадлежит. Тогда два пикселя (i_1, j_1) и (i_2, j_2) четырехсвязны, если $|i_1 - i_2| + |j_1 - j_2| = 1$, и восьмисвязны, если $\max(|i_1 - i_2|, |j_1 - j_2| = 1$[1]. Тогда граничной точкой объекта, соответствующего некоторому классу, называется пиксель, у которого есть хотя бы один четырех- или восьмисвязный пиксель. Для каждой *i*-й строки и каждого *j*-го столбца матрицы P отыскивается новая внешняя граница. Пиксель p_{ij} является началом новой внешней границы, если выполняется условие: $p_{ij} = 1, p_{ij-1} = 0$,.

Как только обнаружено начало границы для некоторого класса объектов, выполняется последовательный обход матрицы P. Все восемь связных пикселей текущего p_{ij} проверяются на принадлежность границе согласно условию $N_{(i_2,j_2)} = (i_2 + \delta_1, j_2 + \delta_2)_k$, где i_1, i_2, j_1, j_2 - координаты проверяемых пикселей, δ_1, δ_2 - стороны проверяемой границы $N_{(i_2,j_2)}$. Как только контур замкнётся, и текущий p_{ij} совпадёт с исходным, контур можно считать найденным. Дополнительно выполняется аппроксимация Дугласа-Пекера [12] с условием $\max_n dist(P_m, Q_k, Q_{k+1}) \leqslant \varepsilon$, $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ для сглаживания и более точного обнаружения контуров,

[1] Два пикселя считаются четырехсвязными, если они имеют общее ребро, то есть соприкасаются сторонами, но не углами. При восьмисвязности пиксели считаются соседними, если они соприкасаются хотя бы углом (то есть их координаты могут отличаться не более чем на единицу по каждой оси).

Таблица. Результаты тестирования трех версий модели

№ итерации	Число изображений до расширения, ед.	Число изображений после расширения, ед.	Значения гиперпараметров [7]			Точность обнаружения классов, %
			conf	iou	imgsz	
1	100	300	0,5	0,8	1280	65
2	500	1500	0,5	0,65	1280	80
3	1000	3000	0,6	0,7	1280	96

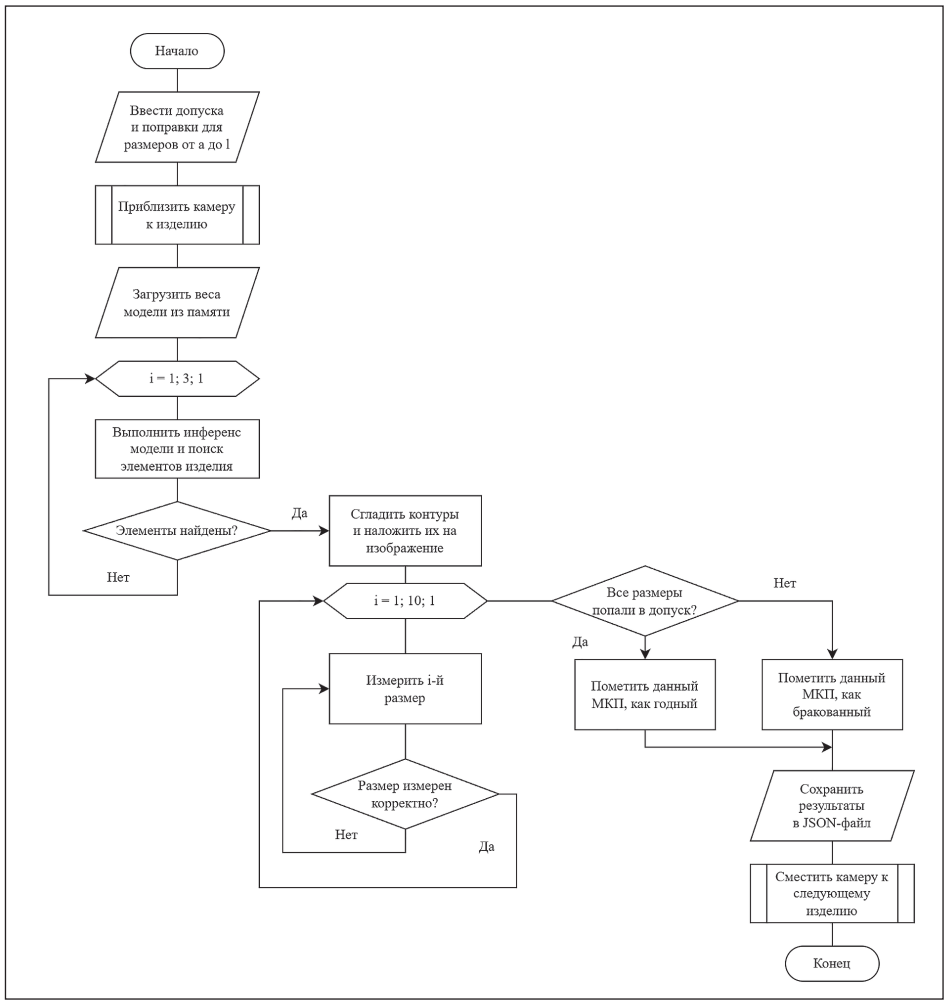


Рис. 2. Блок-схема алгоритма инспекции металлокерамических подложек

где P_m – линия контура, Q_k, Q_{k+1} – точки контура, обрабатываемые на шаге k, ε – максимально допустимое расстояние между точками.

Классифицируются на изображении следующие элементы:

- outer – внешняя граница МКП;
- left – левый участок металлизации P-образной формы;
- right – правый участок металлизации I-образной формы.

Разметка датасетов выполнена средствами программы Roboflow сегментами формата YOLO-seg методом полигональных масок [10]. Границы масок проводятся либо по внешней границе изделия в случае класса outer, либо по границам «металлизация-керамика» для классов left, right вне зависимости от уровня тени и локальных цветовых флуктуаций. Дополнительно для расширения датасета создано по две копии изображений с применением цветовых и контрастных джиттеров.

Результаты обучения и тестирования трех версий модели YOLO-12 с дообучением и последовательным расширением выборки представлены в таблице.

Мера точности в данном эксперименте – отношение числа измерений, при которых корректно выделены элементы МКП, к общему числу измерений [13]. Таким образом, наиболее эффективным для решения данной задачи является метод с применением классификатора на базе сверточной нейронной сети YOLO-12 [10]. С применением этого метода реализован алгоритм измерения расстояний между обнаруженными структурными элементами МКП, представленный на рис. 2.

Алгоритм, разработанный специалистами АО «ЦКБ «Дейтон» для инференса нейросетевой модели на базе YOLO-12, обеспечивает корректную проверку размеров на МКП и обработку некорректных измерений и ситуаций, когда элементы МКП не обнаружены. Пример выходного изображения с результатами обнаружения структурных элементов МКП и их измерения показан на рис. 3.

На рис. 3 размеры *a*, *b*, *c*, *d*, *i*, *k* отмечены как годные, а размеры *f*, *h*, *l* в допуск не попали. Размеры *e*, *g*, *j* в процессе внедрения варианта АПАК для обнаружения дефектов МКП и консультаций с технологами-инспекторам АО «Завод «Марс», признаны необязательными для контроля и измеряются для полноты статистических данных. Динамика роста точности алгоритмов АПАК показана на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Разработан и внедрён алгоритм адаптивного обнаружения и измерения расстояний между элементами металлизации на изображении МКП на основе глубокого машинного обучения, обеспечивающий точность автоматического измерения выше 95%, автоматизирующий процесс оптического контроля качества. Алгоритм снижает нагрузку и повышает эффективность работы технологов-инспекторов.

Новый вариант АПАК, разработанный для обнаружения дефектов МКП, имеет перспективы работы с более широкой номенклатурой новых ИЭТ (металлокерамических корпусов и подложек), чем более ранние версии АПАК, ввиду повышенной инвариантности нейронных сетей к изменениям параметров цветности и структуры МКП. Это дает перспективы для роботизированной работы в поиске дефектов в режиме 24/7 и исключает влияние человеческого фактора.

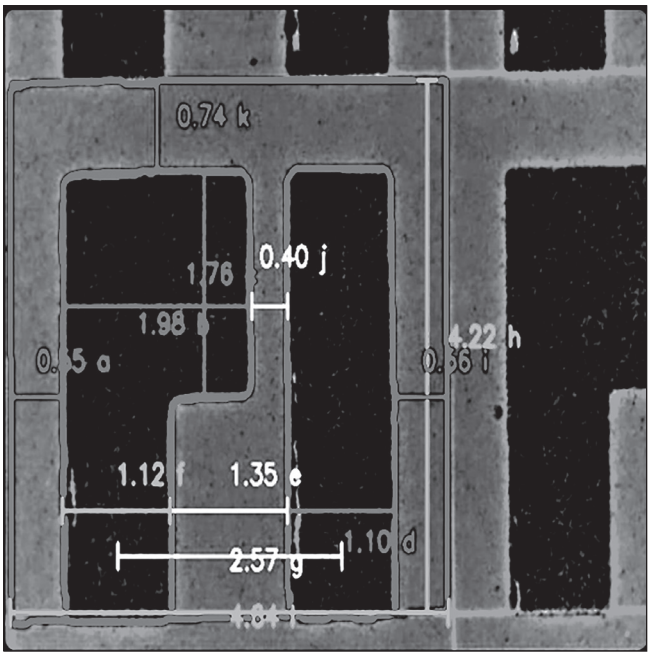


Рис. 3. Результат измерения структурных элементов МКП и расстояний между ними

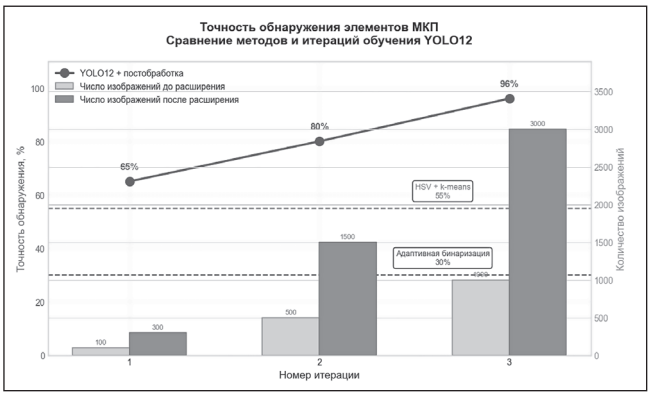


Рис. 4. Динамика изменения точности измерений с развитием алгоритмов АПАК

Список литературы

1. *Коршунов А.* Брак по расчетам: проверку микроэлектроники поручили роботу-инспектору с ИИ // Известия. – 2025.
2. Новые российские системы контроля дефектов в микроэлектронике: запуск намечен на 2027 год // IT-World. – 2024.
3. *Xu J., Zhang, J. Kuang*, Influence of Firing Temperature and Atmospheric Conditions on Processing of Direct Bond Copper (DBC) // In: Conveyor Belt Furnace Thermal Processing. 2018. Springer, Cham.
4. *Ахметгалиев Р., Ермолаев Е., Шугаепов Ш.* Новые возможности АО «Завод полупроводниковых приборов» в области спекания керамических материалов // Электроника НТБ. 2021. № 9.
5. *Дормидошина Д., Евстифеев Ю., Рубцов Ю.* Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Ч. 1. Технические средства настройки изображений для обнаружения дефектов в видимом диапазоне // Электронные компоненты № 2, 2025.
6. *Антонов К., Бойков И., Дормидошина Д. и др.* Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Ч. 9. Внедрение АПАК для автоматизации процесса обнаружения дефектов на металлокерамических корпусах типа 4 // Электронные компоненты. 2025.№ 10.
7. *Chen T.-W., Chen Y.-L., Chien S.-Y.* Fast image segmentation based on K-Means clustering with histograms in HSV color space // 2008 IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing. – IEEE, 2008. – P. 850-855
8. *Дормидошина Д., Евстифеев Ю., Рубцов Ю.* Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Ч. 2. Измерение обнаруженных дефектов в видимом диапазоне // Электронные компоненты. 2025. № 3.
9. *Дормидошина Д., Евстифеев Ю., Иванов К., Рубцов Ю.* Алгоритмы контрастного автофокуса для поиска дефектов в АПАК // Технологии в электронной промышленности. 2026.№ 2.
10. *Tian Y., Ye, Q. and Doermann, D.* YOLOv12: Attention-Centric Real-Time Object Detectors, Art. no. arXiv:2502.12524, 2025.
11. *Abe S., Suzuki N.* Anomalous diffusion of volcanic earthquakes // EPL. 2015, 110(5).
12. *Douglas D., Peucker T.* Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature // The Canadian Cartographer. 1973.10 (2). P. 112-122.
13. *Дормидошина Д., Евстифеев Ю., Ключников В. и др.* Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Ч. 14. Методы инспекции покрытий поверхностей изделий электронной техники // Электронные компоненты. 2026. № 3.

Бойков Илья Иванович *– инженер,*
Дормидошина Дарья Андреевна *– технический директор,*
Евстифеев Юрий Алексеевич *– канд. техн. наук, старший научный сотрудник,профессор,*
Рубцов Юрий Васильевич *– генеральный директор – главный конструктор, АО «ЦКБ «Дейтон»*